



Federação das Indústrias do Estado da Bahia

CENTRO UNIVERSITÁRIO SENAI CIMATEC

Engenharia Elétrica

Projeto Theoprax de Conclusão de Curso

Desenvolvimento do robô de inspeção.

Apresentada por: Michael Faraday
John Nash
James Clerk Maxwell
Nikola Tesla

Orientador: Prof. Marco Reis, M.Eng.

Setembro de 2018

Michael Faraday
John Nash
James Clerk Maxwell
Nikola Tesla

Desenvolvimento do robô de inspeção.

Projeto Theoprax de Conclusão de Curso apresentada ao , Curso de Engenharia Elétrica do Centro Universitário SENAI CIMATEC, como requisito parcial para a obtenção do título de **Bacharel em Engenharia.**

Área de conhecimento: Interdisciplinar
Orientador: Prof. Marco Reis, M.Eng.

Salvador
Centro Universitário SENAI CIMATEC
2016

Dedico este trabalho a ...

Agradecimentos

Salvador, Brasil
dia de Setembro de 2018

Michael Faraday

John Nash

James Clerk Maxwell

Nikola Tesla

Resumo

Escreva aqui o resumo da dissertação, incluindo os contextos geral e específico, dentro dos quais a pesquisa foi realizada, o objetivo da pesquisa, assunção filosófica, os métodos de pesquisa usados e as possíveis contribuições que o que é proposto pode trazer à sociedade.

Palavras-chave: Palavra-chave 1, Palavra-chave 2, Palavra-chave 3, Palavra-chave 4, Palavra-chave 5

Abstract

Escreva aqui, em inglês, o resumo da dissertação, incluindo os contextos geral e específico, dentro dos quais a pesquisa foi realizada, o objetivo da pesquisa, assunção filosófica, os métodos de pesquisa usados e as possíveis contribuições que o que é proposto pode trazer à sociedade.

Keywords: Keyword 1, Keyword 2, Keyword 3, Keyword 4, Keyword 5

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Objetivos	3
1.1.1	Objetivos Específicos	3
1.2	Justificativa	4
1.3	Requisitos do cliente	6
1.4	Organização do Projeto Theoprax de Conclusão de Curso	6
2	Conceito do Sistema	7
2.1	Estudo do estado da arte	7
2.2	Descrição do sistema	18
2.2.1	Especificação técnica	23
2.2.2	Arquitetura geral do sistema	23
2.2.3	Arquitetura de software	24
2.3	Desdobramento da função qualidade	24
2.3.1	Requisitos técnicos	24
3	Materiais e Métodos	25
3.1	Especificação dos componentes	25
3.1.1	Estrutura analítica do protótipo	25
3.1.2	Lista de componentes	25
3.2	Diagramas mecânicos	25
3.3	Modelo esquemático de alimentação e comunicação	25
3.3.1	Diagramas elétricos	25
3.3.2	Esquemas eletrônicos	26
3.4	Especificação das funcionalidades	26
3.4.1	Fluxo das informações	27
3.4.2	Motion Planning	27
3.4.2.1	Definição da funcionalidade	27
3.4.2.2	Dependências	28
3.4.2.3	Premissas Necessárias	28
3.4.2.4	Descrição da Funcionalidade	28
3.4.2.5	Saídas	29
3.4.3	Actuation	30
3.4.3.1	Definição da funcionalidade	30
3.4.3.2	Dependências	30
3.4.3.3	Premissas Necessárias	30
3.4.3.4	Descrição da Funcionalidade	30
3.4.3.5	Saídas	31
3.4.4	Power Management	32
3.4.4.1	Definição da funcionalidade	32
3.4.4.2	Dependências	32
3.4.4.3	Premissas Necessárias	32
3.4.4.4	Descrição da Funcionalidade	32
3.4.4.5	Saídas	33
3.4.5	System Integrity Check	34

3.4.5.1	Definição da funcionalidade	34
3.4.5.2	Dependências	34
3.4.5.3	Premissas Necessárias	34
3.4.5.4	Descrição da Funcionalidade	35
3.4.5.5	Saídas	36
3.5	Interface do Usuário	36
3.6	Simulação do sistema	36
4	Resultados	37
4.1	Testes unitários	37
4.2	Testes integrados	37
4.3	Avaliação da prontidão tecnológica	37
4.4	Trabalhos futuros	37
5	Conclusão	38
5.1	Considerações finais	38
A	QFD	39
B	Diagramas mecânicos	40
C	Diagramas eletro-eletrônicos	41
D	Wireframes	42
E	Logbook	43
	Referências	44

Lista de Tabelas

- 2.1 Parâmetros de DH do ELIR , para a verificação do deslocamento das rodanças das unidades de tração 20

Lista de Figuras

1.1	Inspeção de linhas de transmissão feita por aeronaves tripuladas	2
1.2	Interação humana durante a inspeção de linhas de transmissão.	2
1.3	Realização de inspeção em linhas de transmissão através da observação humana.	3
2.1	Protótipo do robô desenvolvido por Ventrella et. al.	8
2.2	Teste em campo realizado com o robô para instalação e remoção de esferas de sinalização aérea.	8
2.3	Configuração do robô de inspeção.	9
2.4	Robô LineScout.	9
2.5	Robô híbrido e seus componentes.	10
2.6	Robô Expliner.	10
2.7	VANTs utilizados como plataforma de testes.	11
2.8	Sistema de monitoramento aéreo para linhas de transmissão de energia.	11
2.9	Teste do robô de inspeção.	12
2.10	Modelo 3D do robô bípede para inspeção de linhas de transmissão.	13
2.11	Demonstração da sequência de movimentos do Cable Crawler ultrapassando uma torre.	13
2.12	Configuração geral do robô suspenso por fio com pernas iguais.	13
2.13	Equipamento para inspeção de luvas de emendas de linhas de transmissão.	14
2.14	Robô Ti em teste.	15
2.15	Robô modular.	15
2.16	Esboço inicial do PIRO.	16
2.17	Movimento da lagarta Caterpillar.	17
2.18	Configuração básica da segunda versão do robô PIRO.	17
2.19	Protótipo do robô ELIR.	19
2.20	Vista frontal e lateral do robô ELIR.	20
2.21	Esquema do ELIR com os sistemas de coordenadas das suas articulações, para a verificação do deslocamento das roldanas das unidades de tração.	20
2.22	Configuração de juntas, ângulos e links para validação da matriz homogênea obtida na análise cinemática.	21
2.23	Modelo esquemático do robô ELIR.	22
2.24	Arquitetura do robô ELIR.	24
3.1	Fluxo de informações do sistema.	27
3.2	Fluxograma de funcionamento da funcionalidade de Motion Planning	29
3.3	Fluxograma da funcionalidade Actuation	31
3.4	Fluxograma de funcionamento da funcionalidade de Power Management	33
3.5	Fluxograma da rotina para checagem do sistema	35

Lista de Siglas

THEOPRAX
WWW World Wide Web

Lista de Simbolos

Introdução

No Brasil, a eletricidade é gerada por hidrelétricas, termoelétricas, parques eólicos e usinas nucleares. Na maioria dos casos, devido a condições geográficas e de segurança, a energia gerada nem sempre é utilizada ou consumida no local de sua geração. Portanto, há a necessidade do uso de linhas de transmissão para transportar energia gerada na fonte geradora para a carga do consumidor ([RANGEL; KIENITZ; BRANDÃO, 2009](#)). O mercado consumidor brasileiro é composto de cerca de 47 milhões de unidades. Em termos de linhas de transmissão de energia, são cerca de 98.648,3 km, que devem estar operando 24 horas por dia, 7 dias por semana, 365 dias por ano e em perfeito estado de manutenção, para garantir eletricidade para os consumidores ([ONS, 2018](#))

No Brasil, há uma quantidade considerável de linhas de transmissão de alta tensão que já ultrapassaram a vida útil as quais foram destinadas. Com o envelhecimento dos cabos, a inspeção para manutenção preventiva é um fator de extrema relevância para garantir o perfeito funcionamento dos sistemas elétricos. De um modo geral, as inspeções nas linhas de transmissão de alta tensão são realizadas regularmente de forma visual, a fim de identificar a necessidade da realização de manutenções preventivas. As inspeções buscam verificar a integridade física dos componentes das linhas, em termos de fissuras, corrosão e eventuais danos que venham a prejudicar o fornecimento de energia elétrica. Essas inspeções envolvem a análise da integridade estrutural das torres, da condição dos isoladores, das conexões das linhas de transmissão, dentre outros, a fim de se verificar a existência de eventuais pontos de ruptura.

Um dos métodos empregados para detecção de pontos quentes nos cabos é o imageamento térmico, que é capaz de identificar uma elevação de temperatura nos cabos, o que é um indício de possíveis pontos de ruptura. A inspeção através de câmera térmica é uma importante ferramenta no campo das inspeções para manutenções preventivas. Outros pontos a serem inspecionados envolvem as condições do local onde as torres são instaladas, pois a vegetação e eventuais construções devem ser mantidas a uma distância mínima segura, tal que não ocorra nenhum contato entre quaisquer estruturas e as torres ou cabos de transmissão, evitando assim interferências no funcionamento da linha.

Além disso, é essencial a garantia de dispor-se de um terreno em condições de trânsito de veículos para o transporte do pessoal de manutenção, transporte de ferramentas, dentre outros fatores. Durante vários anos, a inspeção de linhas de transmissão de alta tensão tem sido feita regularmente através de aeronaves tripuladas. As aeronaves executam vôos

em baixa altitude e muito próximos das linhas de transmissão conforme mostrado nas Figuras 1.1 e 1.2.



Figura 1.1: Inspeção de linhas de transmissão feita por aeronaves tripuladas.



Figura 1.2: Interação humana durante a inspeção de linhas de transmissão.

Em alguns casos, devido às características geográficas da região, condições climáticas e outros fatores que venham a dificultar o sobrevôo, há uma grande exposição dos tripulantes a riscos associados à tarefa. Além dos perigos aos quais os tripulantes são expostos, a inspeção feita com aeronaves tem um custo bastante elevado. Outra forma alternativa de inspeção é o uso de veículos terrestres, porém essa forma é muito limitada, pois boa parte das linhas de transmissão está localizada em áreas de difícil acesso terrestre, muitas vezes restritas pelas características geográficas da região. Além disso, o ângulo de visão é, muitas vezes, desfavorável para a realização da inspeção.

Outra maneira de inspecionar as linhas de transmissão é através de eletricistas que literalmente caminham sobre os cabos de linhas de transmissão de alta tensão (Figura 1.3),



Figura 1.3: Realização de inspeção em linhas de transmissão através da observação humana.

realizando inspeção visual e termográfica. Esse tipo de inspeção é lenta e não é viável, tendo em vista que o país possui milhares de quilômetros de linhas de transmissão.

Neste contexto vários robôs de inspeção de linhas de transmissão foram desenvolvidos, porém poucos deles consistiram em projetos de engenharia que sejam aplicáveis no mundo real, além disso a maioria eram robôs tele-operados, ou seja robôs controlados por seres humanos. Um dos pontos diferenciais deste projeto de tese é a proposição de um desenvolvimento de uma navegação autônoma utilizando técnicas de aprendizagem de máquinas até então não utilizadas em robôs de inspeção de linhas de transmissão de alta tensão.

1.1 *Objetivos*

Nesta seção os objetivos principal (também pode-se se utilizar a palavra meta) da monografia de graduação ou especialização, dissertação de mestrado ou tese de doutorado são apresentados.

1.1.1 *Objetivos Específicos*

Nesta seção os objetivos específicos (também pode-se se utilizar a palavra meta) da monografia de graduação ou especialização, dissertação de mestrado ou tese de doutorado são apresentados.

1.2 Justificativa

A inspeção de linhas de transmissão de alta tensão é uma tarefa difícil e altamente perigosa, atualmente esta inspeção é realizada através do auxílio de helicópteros os quais percorrem trajetórias próximas às linhas de transmissão e utilizam de câmeras termográficas as quais medem a temperatura nos cabos a partir da associação da quantidade de radiação emitida em determinada faixa de comprimento de onda com uma determinada temperatura. Porém os gastos com este tipo de inspeção são extremamente elevados, como consequência, as empresas responsáveis pela transmissão de energia não monitoram continuamente as condições dos cabos, e realizam inspeções nas linhas de transmissão em intervalos grandes. Outro modo de inspecionar as linhas de transmissão é através de eletricistas que literalmente andam sobre os cabos das linhas de transmissão de alta voltagem fazendo uma inspeção visual e podendo levar algum equipamento para medição de temperatura ao longo da linha, porém este tipo de inspeção é lenta e é inviável verificar milhares de quilômetros de linhas de transmissão utilizando este método. Ambos os modos de inspeção de linhas de transmissão são arriscados, trazem perigos para as pessoas que estão a bordo do helicóptero; já que, este tem de voar próximo às linhas de transmissão e trazem perigos para o eletricista que irá andar sobre os cabos inspecionando-os visualmente ou com auxílio de algum equipamento, além de desconhecer-se completamente o efeito dos campos eletromagnéticos intensos desta região sobre a saúde destes eletricistas. Como consequência, realizar a inspeção de linhas de transmissão através da utilização de robôs móveis é algo que vem ganhando destaque no século XXI. Isto somente foi possível por causa dos avanços tecnológicos como sistema de localização global, os sistemas de transmissão de informação sem fio, a construção de micro-controladores mais baratos, rápidos e com maior capacidade de processamento, além dos grandes avanços que a computação e a microeletrônica têm obtido. Com isso as tarefas que seres humanos executam em ambientes insalubres, perigosos ou inóspitos poderão ser substituídas por uma mão-de-obra automatizada. Além disso, a aplicação da robótica móvel pode ser utilizada para a redução de custos. No caso específico deste trabalho, a utilização de robôs de inspeção para linhas de transmissão atende a ambos os aspectos. Um robô de inspeção de linhas de transmissão deve ser capaz de desviar de obstáculos como grampos de suspensão, grampos terminal passante, emendas a compreensão, emenda total pré-formada, tentos partidos, cabos amassados e dispositivos anti-vibração como amortecedores e festão. Estes obstáculos devem ser transpostos por sequências de movimentos executadas pelo robô. Além disso, idealmente o robô deve apresentar o menor peso, comprimento, altura, ter perfeita aerodinâmica, um formato desprovido de pontas, a maior autonomia possível, baixo custo, além de apresentar uma blindagem eletromagnética que deve impedir que os intensos campos magnéticos e elétricos, devido às elevadas correntes que passam nas linhas de transmissão, danifiquem os componentes eletrônicos, além disso, deve apresentar um sistema de comunicação wireless que não seja influenciado pelo elevado campo eletromagnético ao redor dos cabos, além de apresentar motores com elevado rendimento

mecânico e elétrico, não apresentar derrapagem quando o mecanismo para movimentação das rodas for acionado, dentre outros.

Pagnano et. al ([PAGNANO; HÖPF; TETI, 2013](#)) conclui que uma das principais buscas em futuros projetos devem estar centradas no desenvolvimento de detecção e transposição de obstáculos de forma autônoma, ou seja, não mais atribuir sequências de movimentos para os robôs mas desenvolver algoritmos de controle para que a detecção e ultrapassagem seja realizada de forma autônoma. Outro ponto a se observar é a completa abrangência de autonomia do robô durante sua navegação.

Embora respondam por um número pequeno de ocorrências, se comparadas com as ocorrências em linhas de distribuição, um evento em uma linha de transmissão impacta de maneira desproporcionalmente mais severa, visto que a quantidade de clientes atendidos pelas linhas de transmissão é bem superior ao da linha de distribuição, afinal estas últimas são alimentadas pelas linhas de transmissão.

A manutenção preventiva é o procedimento mais adequado para aumentar a confiabilidade e evitar ocorrências indesejáveis em linhas de transmissão. No entanto, devido ao maior nível de tensão e consequentemente de maior escala das estruturas físicas da linha; efetuar a manutenção preventiva de maneira manual é uma tarefa muito difícil, custosa, por vezes requerendo o desligamento da linha.

O uso de uma ferramenta automatizada para a inspeção destas linhas possibilitará uma redução no número e na freqüência de eventos em linhas de transmissão, aumentando a confiabilidade do sistema elétrico e reduzindo as perdas de energia; contribuindo para a melhoria do processo interno e a qualidade do serviço oferecido ao consumidor final, o que resulta em ganho financeiro para as concessionárias. Além deste benefício, é importante ressaltar que interrupções no fornecimento, mesmo que por curto espaço de tempo, têm como consequência impactos negativos sobre a sociedade e sobre a imagem da concessionária, sujeita à exposição na mídia.

Porém, a prática mostra que a idealização de soluções para os problemas levantados é algo distante da realidade, isto porque, além de ser fisicamente impossível de representar-se de forma exata situações ideais na prática; devido às perdas de energia e às inúmeras variáveis que teriam de ser abordadas para representar um problema de forma exata, mesmo que fosse possível construir um modelo muito próximo a realidade, o custo iria ser um dos fatores que iria inviabilizar a escolha dos melhores materiais e dos melhores dispositivos. Assim deve-se observar que, em geral, os robôs devem atender as características conforme certos requisitos de projeto, de modo que se aproxime ao máximo da condição ideal, desde que o custo permaneça abaixo de um valor aceitável.

1.3 Requisitos do cliente

asjdfkasjdlfjsdlk;f

1.4 Organização do Projeto Theoprax de Conclusão de Curso

Este documento apresenta x capítulos e está estruturado da seguinte forma:

- **Capítulo 1 - Introdução:** Contextualiza o âmbito, no qual a pesquisa proposta está inserida. Apresenta, portanto, a definição do problema, objetivos e justificativas da pesquisa e como este projeto theoprax de conclusão de curso está estruturado;
- **Capítulo 2 - Nome do capítulo:** XXX;
- **Capítulo 5 - Conclusão:** Apresenta as conclusões, contribuições e algumas sugestões de atividades de pesquisa a serem desenvolvidas no futuro.

Conceito do Sistema

Eu tenho que encontrar o meu caminho
ao longo da estreita cadeia de fatos.

(Michael Faraday)

2.1 *Estudo do estado da arte*

Diante dos desafios apresentados nesta tese, faz-se oportuno apresentar os projetos que contribuíram para o desenvolvimento da solução final. De forma muito incipiente os projetos para desenvolvimento de robôs de inspeção em linhas de transmissão, ainda são poucos. Pagnano et. al ([PAGNANO; HÖPF; TETI, 2013](#)) se propos a descrever um roadmap para o desenvolvimento futuro dos robôs de inspeção em linha de transmissão, reforçando o aspecto da autonomia dos robôs e sua confiabilidade na execução das transposições dos obstáculos.

Como apontado anteriormente através do capítulo inicial desta tese, objetiva-se o desenvolvimento de robôs de inspeção no qual utiliza as linhas de transmissão para realizar sua movimentação, neste sentido pode-se observar um dos primeiros trabalhos no desenvolvimento destes robôs apresentado por Ventrella et.al ([VENTRELLA et al., 2003](#)). Este robô foi desenvolvido para deslocar-se ao longo do cabo de transmissão tendo controle de parada, avanço e retorno via rádio, ou seja tele-operado. O sistema pode gerar imagens do cabo onde são enviadas também via rádio, com isso o operador pode também realizar a transposição dos obstáculos. A Figura 2.1 apresenta o protótipo do robô, mostrando o seu sistema de locomoção.

O conceito de um robô móvel para instalação e remoção autônoma de esferas de sinalização aéreas em linhas de transmissão de energia (Firugar 2.2) é apresentado por Campos et al. ([CAMPOS et al., 2002](#)). Segundo os autores, um computador de bordo é responsável pelo controle através dos dados obtidos pelos sensores e dos comandos enviados por um operador de solo. Os comandos do operador são transmitidos por ondas de rádio, o que permite que o sistema seja remotamente operado a uma distância de até 2 km. O equipamento foi testado em campo em uma situação real e mostrou-se eficiente e robusto. De acordo com Gonçalves e Carvalho ([GONÇALVES; CARVALHO, 2013](#)), apesar do mecanismo proposto por Campos et al. ([CAMPOS et al., 2002](#)) não superar obstáculos

Figura 2.1: Protótipo do robô desenvolvido por Ventrella et. al.



nem navegar em linhas entre duas torres, é simples e funcional.

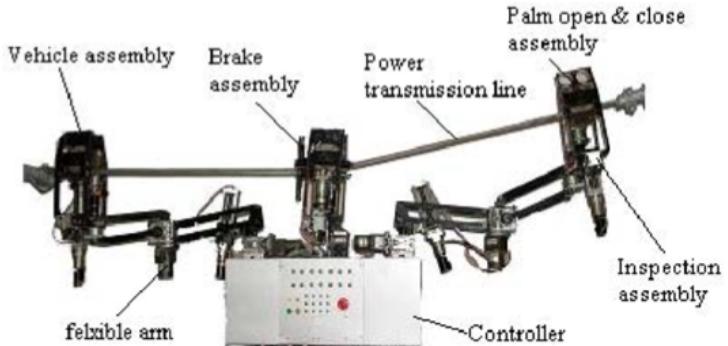
Figura 2.2: Teste em campo realizado com o robô para instalação e remoção de esferas de sinalização aérea.



Apoiado pelo financiamento do Plano Nacional Chinês 863, Zhou et al. ([ZHOU et al., 2005](#)) propuseram um robô (Figura 2.3) capaz de ultrapassar qualquer tipo de obstáculo (até torres) ao trafegar ao longo de uma linha de transmissão de até 110 kV. O robô conta com uma câmera; as imagens de inspeção, por sua vez, são enviadas para uma estação de trabalho do solo através de um sistema de comunicação sem fio.

De acordo com a Figura 2.3; a estrutura mecânica do robô desenvolvido por Zhou et al. ([ZHOU et al., 2005](#)) é composta por cinco grandes partes: mecanismo de movimentação (vehicle driving mechanism); sistema de parada (brake system assembly); braços flexíveis (flexible arms); garras (palm gripper); fonte de alimentação e sistema de controle (power supply and controller). Para assegurar a flexibilidade requerida o robô (que pesa cerca de 45 kg e tem 1,2 m de comprimento) tem 16 eixos de movimentação, podendo vencer inclinações de até 60°.

Figura 2.3: Configuração do robô de inspeção.

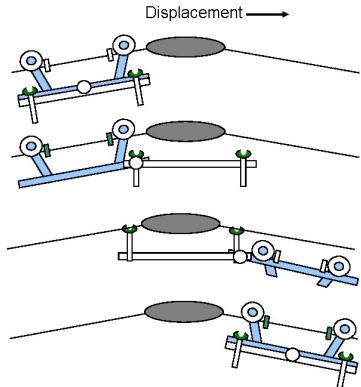


Como parte do programa de pesquisa Hydro-Québec Montambault e Pouliot ([MONTAMBault; POULIOT, 2007](#)) encarregaram-se do desenvolvimento de uma tecnologia para inspeção e manutenção de linhas de transmissão de 735 kV, denominada LineScout (Figura 2.4). Segundo por Montambault e Pouliot ([MONTAMBault; POULIOT, 2007](#)), o protótipo deste robô móvel tele operado (pesando 100 kg) foi testado e validado em muitas configurações de linhas e de sequências de obstáculos, sob condições de campo.

Figura 2.4: Robô LineScout.



(a) robô em operação

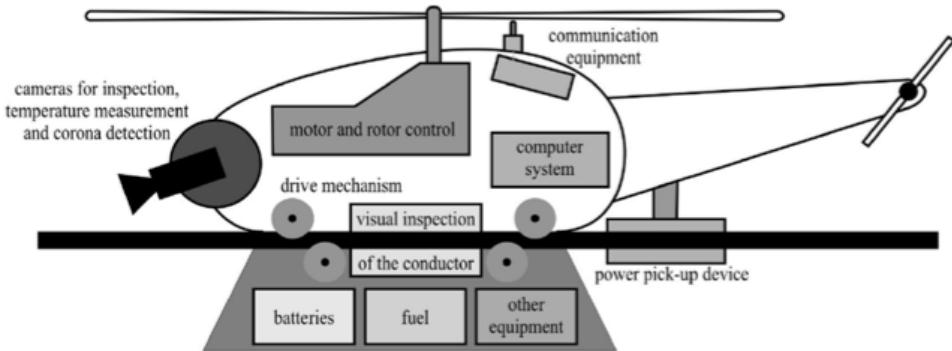


(b) esquema de movimentos para ultrapassagem de obstáculos.

O LineScout, como mostrado na Figura 2.4, utiliza o cabo condutor como suporte; o uso de rodas para movimentação não só possibilita a locomoção rápida e eficiente ao longo da linha, como também permite passar por cima de alguns obstáculos. Para ultrapassar outros tipos de obstáculos é empregada a sequência de movimentos esquematizados na Figura 2.4b. Em 2008 Katrasnik, Pernus e Likar ([KATRASNIK; PERNUS; LIKAR, 2010](#)) propuseram um conceito híbrido para inspeção de linhas de transmissão; o qual combina o uso de um veículo aéreo não tripulado (VANT) e um robô móvel (Figura 2.5). Em seus estudos conceituais os autores compararam os três tipos de sistemas para inspeção: os robôs móveis, os por veículos aéreos e os híbridos; concluindo que, apesar da baixa qualidade de inspeção e autonomia, o sistema proposto tem como vantagem a universalidade e a facilidade de projeto. Katrasnik, Pernus e Likar ([KATRASNIK; PERNUS; LIKAR, 2010](#))

acreditam ainda que a solução híbrida provavelmente não terá a autonomia de superação de obstáculos possíveis aos robôs móveis tendo, porém, um provável custo menor de desenvolvimento.

Figura 2.5: Robô híbrido e seus componentes.

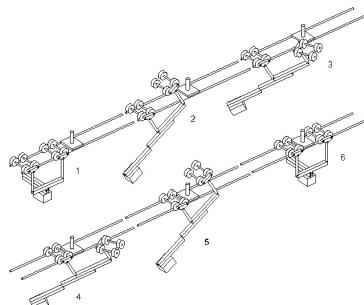


Os primeiros estágios de desenvolvimento do Expliner (Figura 2.6a) são apresentados no artigo de Debenest et al. ([DEBENEST et al., 2008](#)). Este robô tele operado foi projetado para realização de manutenção preventiva de linhas de transmissão de alta-voltagem e conta com dois pontos de apoio e um contrapeso. A movimentação do contrapeso permite que haja o controle da posição do centro de massa e o consequente levantamento em um dos pontos de suporte; este mecanismo possibilita a ultrapassagem de obstáculo (a exemplo do mostrado na Figura 2.6b).

Figura 2.6: Robô Expliner.



(a) robô e sua submontagens.



(b) esquema de movimentos para ultrapassagem de obstáculos.

De acordo com Debenest et al. ([DEBENEST et al., 2008](#)), o Expliner pode ser semi-controlado através de um sistema de comunicação sem fio, ou seja, o usuário está sempre encarregado da sua operação não precisando, porém, controlar todos os detalhes, mas sim autorizar a realização de tarefas pré-programada; as sequências de movimento ficam gravadas na sua memória. Por pesar 84 kg, um cabo de acesso deve ser usado para colocar o robô na linha de transmissão. De acordo com os autores, os testes realizados mostram que o Expliner pode mover-se até m/min e superar inclinações de até 30 graus.

Já a proposta de Rangel, Kienitz e Brandão ([RANGEL; KIENITZ; BRANDÃO, 2009](#)) é

o desenvolvimento de uma plataforma de monitoramento aéreo a ser utilizado para inspecionar linhas de alta voltagem. Para tal, a integridade da linha é verificada com o auxílio de um VANT (Figura 2.8), onde é instaladas câmeras de vídeo, equipamentos de controle e de telemetria. O VANT é pilotado remotamente por um operador que se encontra na estação de solo (Figura 2.8). As imagens capturadas e os dados georreferenciados da linha e do terreno são enviados, em tempo real, ao solo para posterior armazenamento e processamento.

Figura 2.7: VANTS utilizados como plataforma de testes.



Figura 2.8: Sistema de monitoramento aéreo para linhas de transmissão de energia.



Durante a pesquisa da inspeção utilizando VANTS, foi constatado que estes não substituem com plenitude as aeronaves tripuladas nesta tarefa, uma vez que existem limitações quanto à proximidade dos veículos com a linha de transmissão para que não haja interferência eletromagnética no sistema. Os autores citam ainda, que esta proposta presta-se, fundamentalmente, a identificação e diagnóstico do problema, não sendo possível a realização de manutenção corretiva (como ocorre quando há a inspeção por helicóptero tripulado). Li e Ruan (LI; RUAN, 2010) em seu trabalho descrevem o desenvolvimento de um robô móvel para inspeção de linhas de transmissão de 500 kV capaz de superar alguns obstáculos como contrapesos, torre de ancoragem, e torres de torção (Figura 2.9). O robô projetado conta com treze motores e tem sua mobilização, inspirada no comportamento dos macacos. Estruturado em um mecanismo formado por engrenagens sem-fim, rodas, garras, parafusos e porcas ele tem capacidade para escalar linhas com no máximo

60 graus. O protótipo deste robô, (com 30 kg e tem 1,2 m de comprimento e 0,8 m de altura) ainda está em fase de desenvolvimento e carece de uma maior robustez para a efetiva realização de algumas inspeções necessárias para uma boa manutenção preventiva das linhas de transmissão.

Figura 2.9: Teste do robô de inspeção.



O robô proposto por Wang et al. ([WANG et al., 2010](#)) apresentam um mecanismo diferenciado para a realização da inspeção de linhas de transmissão. Como pode ser observado na Figura 2.10, este robô móvel conta com uma estrutura bípede e os seus dois pés podem ser presos à linha de transmissão; os seus ciclos de movimento sob a linha são compostos por fases onde há um único apoio e outras fases onde há dois apoios. Cada perna tem uma junta prismática que permite que o seu tamanho seja ajustado fazendo com que o seu centróide sempre coincida com o eixo da articulação central (hip joint), reduzindo o consumo de energia e mantendo a sua estabilidade na quando o robô está mono apoiado.

O protótipo do robô apresentado por Wang et al. ([WANG et al., 2010](#)) possui 800 mm de altura e 100 mm de largura, quando todas as juntas estão na posição zero; o maior obstáculo que pode transpor tem 300 mm de comprimento. Os autores concluem que os próximos trabalhos a serem realizados com este protótipo devem focar na inclusão de sensor de detecção de linha, controle on-board e testes em ambientes reais de linha de transmissão e obstáculos. O “Cable Crawler” é tratado por Buehringer et. al ([BÜHRINGER et al., 2010](#)), um robô tele operado para inspeção de linha de transmissão de alta voltagem que trafega ao longo do cabo terra. Este robô, que pesa 53 kg, conta com um mecanismo que permite com que ele transponha desde pequenos obstáculos até as torres (como mostrado na Figura 18).

Gonçalves e Carvalho em seus trabalhos ([GONCALVES; CARVALHO, 2010](#)) ([GONÇALVES;](#)

Figura 2.10: Modelo 3D do robô bípede para inspeção de linhas de transmissão.

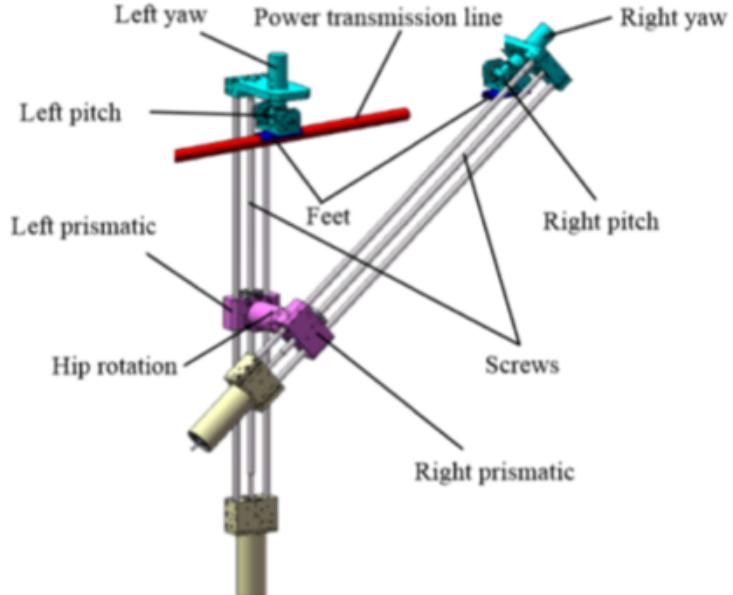
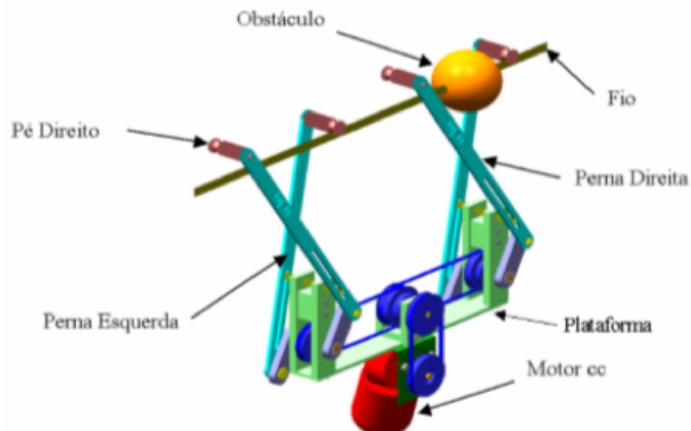


Figura 2.11: Demonstração da sequência de movimentos do Cable Crawler ultrapassando uma torre.



[CARVALHO, 2013](#)) apresentam os resultados dos estudos desenvolvidos a cerca de um robô móvel suspenso por fio projetado para manutenção e inspeção de linhas de energia e/ou telecomunicação. Segundo Gonçalves ([GONÇALVES; CARVALHO; CARVALHO, 2006](#)) este robô, de fácil controle, tem a capacidade de transportar alguns obstáculos, como por exemplo grampos e esferas de sinalização, independentemente de sua posição; uma vez que é dotado de quatro pernas de comprimentos variáveis.

Figura 2.12: Configuração geral do robô suspenso por fio com pernas iguais.



A Figura 2.12 ilustra a configuração geral do robô proposto por Gonçalves e Carvalho (GONÇALVES; CARVALHO; CARVALHO, 2006) (GONCALVES; CARVALHO, 2010). Um dos princípios do seu desenvolvimento é a facilidade de controle, para tal, a movimentação das quatro pernas é sincronizada por um conjunto de polias e correias acionado por um único motor. O Instituto Coreano de Pesquisa em Energia Elétrica propõe, através do trabalho de Lee, Jung e Cho (LEE; JUNG; CHO, 2011), um robô para inspeção de luvas de emenda de linhas de transmissão pela medição do campo magnético. O seu programa de interface com o usuário (remoto) mostra a condição da ferramenta, permitindo com que o operador comande os movimentos do robô; além de calcular e apresentar o grau de excentricidade da luva.

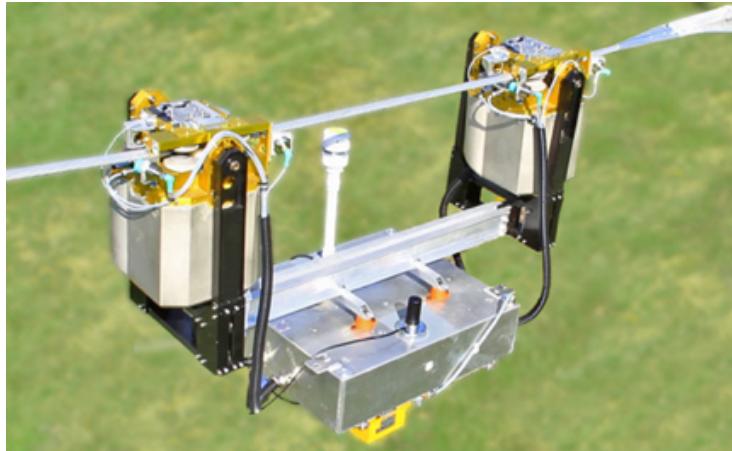
Figura 2.13: Equipamento para inspeção de luvas de emendas de linhas de transmissão.



Como pode ser visto na Figura 2.13, a estrutura do robô para inspeção de luvas de emendas é formada de duas partes: uma responsável pelo movimento e outra pela inspeção. De acordo com Gonçalves e Carvalho (GONÇALVES; CARVALHO, 2013), seu deslocamento assemelha-se a uma lagarta, onde há aderência e locomoção ao longo do cabo através de um sistema de sulcos e ranhuras que permite que o robô supere elevações e depressões sem cair.

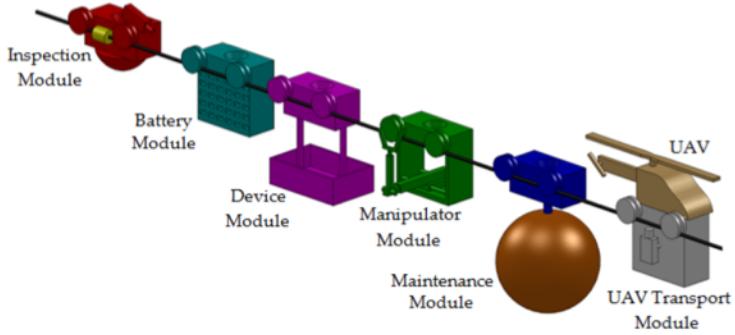
Phillips et al. (PHILLIPS et al., 2012) apresentaram em seu trabalho o robô que autonomamente inspeciona linhas de transmissão de alta voltagem desenvolvido pelo Electric Power Research Institute (EPRI); denominado Ti. No campo, este robô é instalado permanentemente à linha de transmissão e é capaz de transportar os obstáculos através de sistemas de by-pass, também permanentes. O Ti dispõe de câmeras de alta definição, câmaras espectro de infravermelho, detectores de interferência eletromagnética e diversos sensores de radiofrequência; os autores acreditam que, desta maneira, o sistema será capaz de fornecer informações completas, precisas e úteis para otimizar a manutenção de linha e melhorar a confiabilidade da transmissão.

Figura 2.14: Robô Ti em teste.



Baseado na proposta de Katrasnik, Pernus e Likar ([KATRASNIK; PERNUS; LIKAR, 2010](#)), Gonçalves e Carvalho ([GONÇALVES; CARVALHO, 2013](#)) expõem seus estudos a cerca da ideia de um robô modular (Figura 2.15). Nesta solução cada módulo possuirá sua própria movimentação, função e sistema de energia, podendo transitar ao longo do cabo de alta voltagem ou do de terra. O primeiro módulo carregará um UAV, veículo que será responsável pelo carregamento de todos os módulos no momento da ultrapassagem de obstáculos, podendo ser tele operado. Existirá ainda, o módulo incumbido da troca de baterias dos demais.

Figura 2.15: Robô modular.



Gonçalves e Carvalho ([GONÇALVES; CARVALHO, 2013](#)) acreditam que, uma vez que cada módulo possuirá uma finalidade específica, haverá a otimização do seu peso total (dependendo da atividade) reduzindo o consumo de energia. Os autores afirmam, ainda, diante da individualidade dos módulos, que o robô poderá ser projetado para diversas tarefas (inspeção, manutenção, instalação, limpeza, captura de imagens, etc.) sem necessariamente ser pesado e grande (como seria um robô monobloco multitarefa).

Destacaremos no presente trabalho o robô autônomo apresentado por Lima II et al. ([II et al.,](#)) e Mourão et al. ([MOURÃO MIGUEL A. M., 2015](#)) denominado PIRO (Powerlines Inspection Robot) ou D311, fruto da parceria entre CEMIG, SENAI-CIMATEC/BIR (Brazilian Institute of Robotics) e Universidade Federal de Minas Gerais (no âmbito

do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica regulado pela ANEEL).

Figura 2.16: Esboço inicial do PIRO.



De acordo com os autores, o projeto do PIRO tem como objetivo ser uma proposta inovadora diante dos resultados encontrados anteriormente por outros pesquisadores; sendo autônomo para a realização de inspeção visual e térmica de cabos de transmissão de linhas energizadas e transposição automatizada de obstáculos. Para tanto se considerou como pré-requisitos que o robô deve:

- Trabalhar em uma faixa de tensão entre 124,2 kV e 151,8 kV com corrente trifásica de 500 A.
- Ser autônomo, dependendo de operadores apenas para sua instalação e remoção no trecho a ser inspecionado ou por eventuais paradas emergenciais.
- Operar em um cabo condutor LINNET, com diâmetro de 18,3 mm.
- Ter massa menor ou igual a 14 kg, permitindo a instalação em campo com a utilização de hastes por apenas dois operadores.
- Ser provido de blindagem elétrica e magnética de forma a assegurar seu funcionamento na linha de transmissão, ou seja, que não haja danos nos seus componentes devido aos campos eletromagnéticos intensos.
- Ser capaz de transportar sensores e equipamentos para inspeção visual e térmica, diagnosticando possíveis falhas no sistema que podem interferir no fornecimento de energia elétrica.

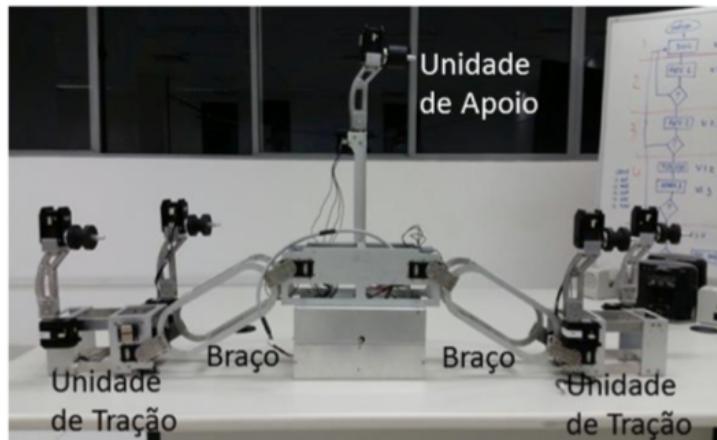
Lima II et al. (II et al.,) e Mourão et al. ([MOURÃO MIGUEL A. M., 2015](#)) afirmam que o mecanismo do D311 para superação de obstáculo foi inspirado no movimento na lagarta Caterpillar (Figura 2.17). De acordo com a Figura 2.18, optou-se, ainda, por uma estrutura mecânica modular composta por: Braços, os quais unem a unidade de tração e de apoio. O módulo de tração, responsável pela força motora. Unidade de apoio,

a qual atua como ponto de referência do equipamento e funciona como mais um ponto de suporte durante a rotina de ultrapassagem de obstáculos.

Figura 2.17: Movimento da lagarta Caterpillar.



Figura 2.18: Configuração básica da segunda versão do robô PIRO.



O PIRO conta com uma estrutura simétrica, que o permite deslocar em ambos os sentidos sem que haja a necessidade de desacoplamento do robô; além de quatro articulações, que provém o número de GDLs necessários seu funcionamento adequado. Sua estrutura é fabricada através de perfis metalon de liga alumínio 2024-T6, o que garantiu redução de tempo de produção, custo e, principalmente, peso. Os autores acreditam que, uma vez que o braço do PIRO tem apenas 153 g e toda a estrutura mecânica tem 1,8 kg; alcançou-se uma inovação ímpar ao estado-da-arte, a massa total da estrutura final do robô é 8,92 kg. Segundo Mourão et al. ([MOURÃO MIGUEL A. M., 2015](#)), durante os testes realizados em laboratório foi constatado: que a morfologia do robô permite que a transposição de obstáculo; que o sistema de acionamento responde de forma precisa aos comandos de deslocamento, velocidade e aceleração além da rapidez e eficácia do sistema de sensoriamento e visualização. Já os testes executado em linha viva de 138 kV, para verificação quanto à susceptibilidade às interferências eletromagnéticas, sendo que os resultados mostram-se satisfatórios. O artigo Lima II et al. ([II et al.,](#)) traz, ainda, um estudo comparativo entre o D311 e outros robôs para inspeção de linhas de alta tensão. Em relação ao LineScout, apresentado por Montambault e Pouliot ([MONTAMBAULT; POULIOT, 2007](#)), o PIRO tem a vantagem de ser autônomo (e não tele operado), ou

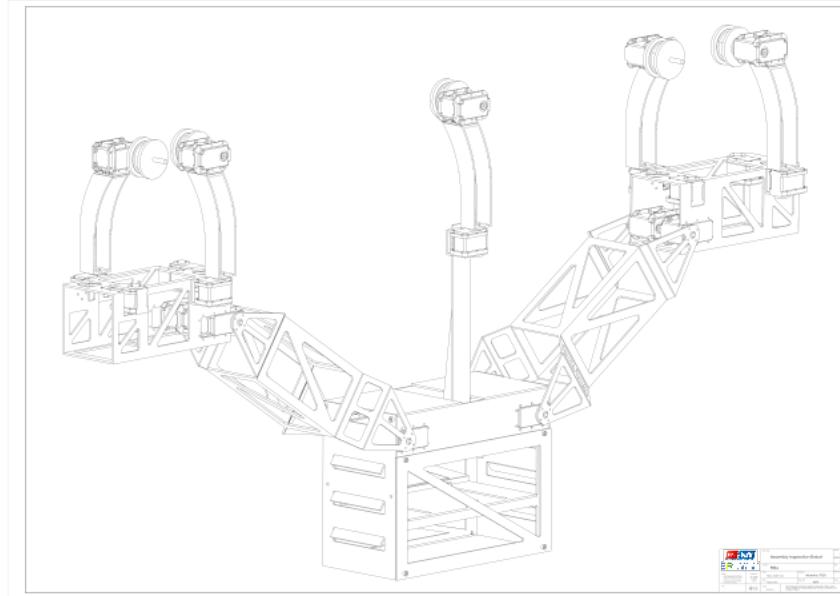
seja, não depende da habilidade do operador; além de ter massa sete vezes menor, permitindo o seu acoplamento manual. A utilização dos VANTs, por sua vez, apesar da sua maior velocidade de inspeção, em comparação com o D311 apresenta as desvantagens da necessidade de extensa área para pouso e decolagem, menor exatidão na localização dos defeitos, grande influência de perturbações externas e taxas de amostragem insuficientes para elevadas velocidades de varredura.

2.2 Descrição do sistema

As concessionárias de energia elétrica e diversas instituições de pesquisa, nos últimos anos vêm trabalhando na busca de uma solução para a inspeção de linhas de transmissão de alta tensão. A abrangência de suas pesquisas perfazem em grande parte no desenvolvimento de robôs para realizar a inspeção. Esta tese tomou como base o sistema mecânico desenvolvido no projeto do primeiro robô de inspeção de linha de transmissão brasileiro de baixo peso, apresentado no VII Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica ([MOURÃO MIGUEL A. M., 2015](#)). A escolha no uso desta solução mecânica originou-se dos resultados alcançados por este projeto diante dos desafios de uma inspeção de linhas de transmissão. Denominado projeto D311 e sob o código Aneel PD-4950-0311/2011, teve como objetivo desenvolver um robô autônomo para executar a inspeção visual e térmica de linhas de transmissão de alta tensão (138kV), realizando automaticamente a transposição de obstáculos presentes na linha de transmissão. Apesar de alcançar os objetivos inicialmente traçados, o sistema de navegação do robô não era autônomo, seu deslocamento e transposição era baseado em reconhecimentos de padrões e todos os algoritmos pré-estabelecidos eram acionados quando do reconhecimento do padrão.

Diante da ideia estabelecida, esta tese promoveu algumas modificações nas estruturas mecânicas para simplificar as modelagens necessárias para a simulação, logo em termos estruturais e dimensionais a estrutura mecânica proposta apresenta modificações consideráveis em relação ao robô do Projeto D311. Para dar suporte a compreensão deste modelo proposto, os desenhos mecânicos desenvolvidos são apresentados no Apêndice ???. Uma das principais diferenças entre a proposta do robô desta tese e do PIRO apresentado por [Mourão Miguel A. M. \(2015\)](#), está no fato deste realizar a detecção e classificação de objetos de forma autônoma, além de desempenhar autonomamente as funções de translação e transposição. Outro ponto a ser considerado é a sua flexibilidade em transportar obstáculos, o robô em questão terá uma capacidade de desempenho maior do que o apresentado por ([MOURÃO MIGUEL A. M., 2015](#)); quanto a sua montagem, o robô apresenta simplicidades na fabricação das peças além de possibilidade um número maior de graus de liberdade necessárias para os movimentos. A proposta para o robô é apresentada na figura [2.19](#).

Figura 2.19: Protótipo do robô ELIR.



Este protótipo será referenciado como robô ELIR, o qual recebe este nome devido a sua representação de Robô de Inspeção Elétrica em inglês, ou seja Electrical Inspection Robot. O ELIR é composto por duas unidades de tração, dois "braços", e uma unidade central. A unidade de tração é composta por um par de garras, com um servomotor e uma roda em cada uma, além disso a estrutura principal da unidade é composta por mais dois servomotores com o objetivo de deslocar as garras da unidade. Os braços são compostos por uma estrutura metálica em alumínio, na extremidade de cada um deles há uma junta de movimentação composta por dois servomotores. A unidade central é onde o processamento do robô se encontra, a unidade também agrega o subsistema de potência do robô.

A proposta do sistema mecânico aqui apresentada foi estudada e simulada por [Sartori \(2018\)](#), que diante do dimensional sugerido pela Figura 2.20 realizou uma análise geométrica do referido sistema robótico ELIR, chegando a conclusão de que não havia interferência mecânica entre a estrutura do robô e os obstáculos durante o processo de movimentação ou de transposição.

De forma resumida, os dimensionais do sistema robótico é apresentado na Figura 2.20 e tomando como referência a Figura 2.21 juntamente com seus parâmetros e matrizes de transformação, chega-se a conclusão que há uma simetria na geometria do robô ELIR, bastando dessa forma permutar entre a base e o efetuador, ou seja as matrizes da cinemática direta são válidas para as duas extremidades.

Consequentemente, tomando o sistema e dividindo-o em cinco partes, as matrizes homogêneas do robô são estabelecidas, levando em consideração os parâmetros de Denavit-

Figura 2.20: Vista frontal e lateral do robô ELIR.

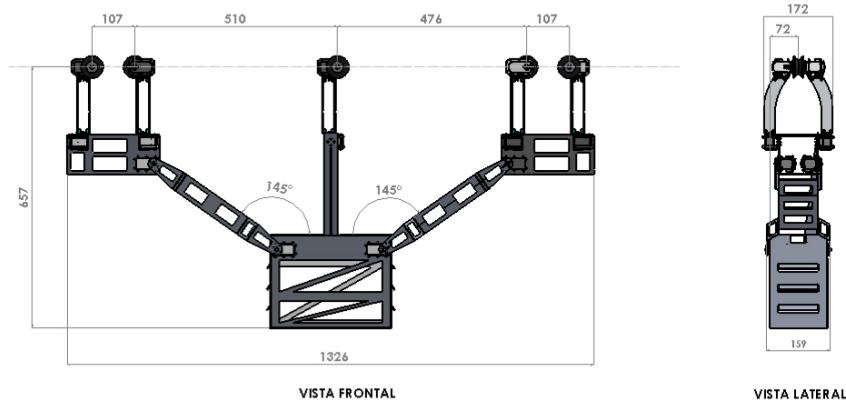
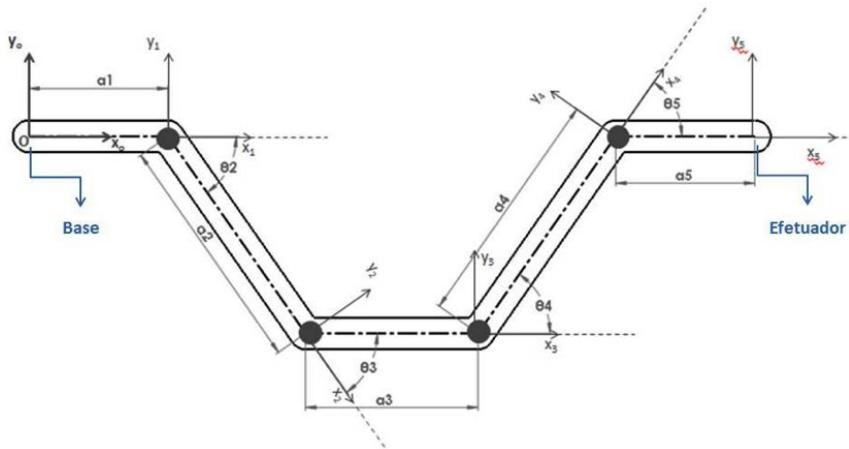


Figura 2.21: Esquema do ELIR com os sistemas de coordenadas das suas articulações, para a verificação do deslocamento das roldanas das unidades de tração.



Hartenberg apresentado na Tabela 2.1 para o robô ELIR, no qual chega-se aos valores dimensionais dos ângulos de cada junta (Figura 2.22) obtidos na análise cinemática.

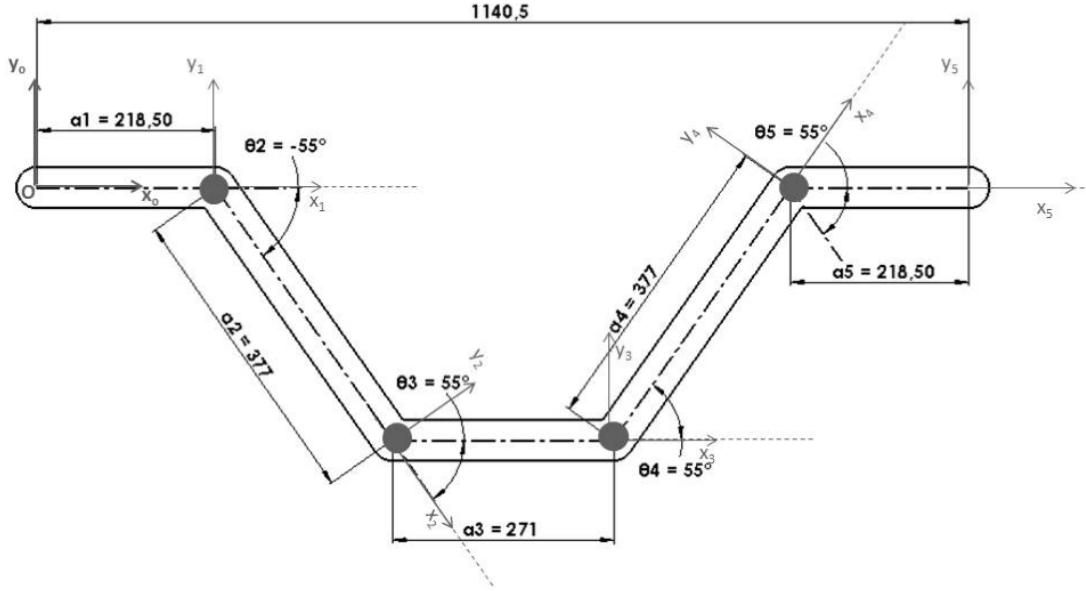
Tabela 2.1: Parâmetros de DH do ELIR , para a verificação do deslocamento das roldanas das unidades de tração

Junta	a_i	d_i	α_i	θ_i
1	a_1	0	0	θ_1
2	a_2	0	0	θ_2
3	a_3	0	0	θ_3
4	a_4	0	0	θ_4
5	a_5	0	0	θ_5

A matriz homogênea de cada parte é dada pela Equação 2.1.

$$A_{n-1}^n = \begin{pmatrix} \cos \theta_n & -\sin \theta_n & 0 & a_n \cos \theta_n \\ \sin \theta_n & \cos \theta_n & 0 & a_n \sin \theta_n \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.1)$$

Figura 2.22: Configuração de juntas, ângulos e links para validação da matriz homogênea obtida na análise cinemática.



Logo levando-se em consideração que o efetuador do robô esteja numa extremidade, tem-se a matriz transformação homogênea da base definida pela expressão 2.2.

$$A_0^5 = A_0^1 \cdot A_1^2 \cdot A_2^3 \cdot A_3^4 \cdot A_4^5 = \begin{pmatrix} r_{1,1} & r_{1,2} & r_{1,3} & x_0^5 \\ r_{2,1} & r_{2,2} & r_{2,3} & y_0^5 \\ r_{3,1} & r_{3,2} & r_{3,3} & z_0^5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.2)$$

Os elementos da matriz apresentada pela equação xx, são definidos por [Sartori \(2018\)](#) e serão tomados como parâmetros para esta pesquisa, diante disso chega-se aos dimensionais apresentados na Figura 2.22 com seus respectivos valores de ângulos, logo podemos encontrar o resultado numérico para a Equação 2.3.

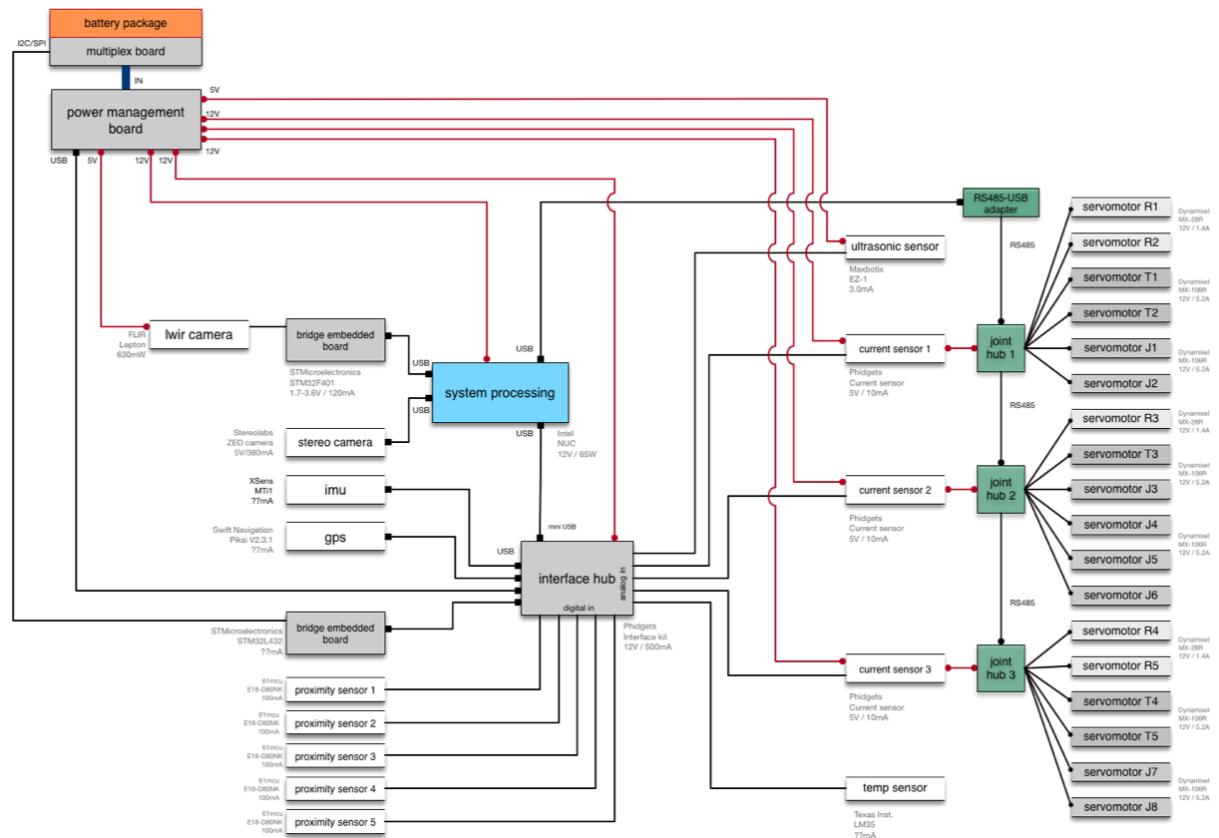
$$A_0^5 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 1140.5 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.3)$$

Com isto, pode-se definir qualquer posição do efetuador no espaço de trabalho considerado, assim como identificar as limitações do robô para os movimentos requeridos. Estas definições serão úteis para a elaboração da simulação pretendida nesta tese.

Vale ressaltar que toda estruturação metálica, com seus dimensionais são apresentados ao final da tese na seção Apêndice, mais especificamente no Apêndice B. Um outro ponto importante a se destacar, é que a análise cinemática inversa analisada e simulada por Sartori (2018) não foi considerada para o desenvolvimento desta tese, em substituição a modelagem matemática será adotado o software *MoveIt!* para estabelecer os posicionamentos das juntas para a realização de uma determinada estratégia a qual se queira desenvolver.

Baseado no conceito inicial do robô, deve-se projetar também os esquemas elétrico e eletrônico do sistema robótico. De forma abrangente a Figura 2.23 apresenta o modelo esquemático do robô ELIR.

Figura 2.23: Modelo esquemático do robô ELIR.



Como pode-se observar e de forma abrangente, os principais elementos que compõem o robô são:

- 13 servomotores de 8.4Nm
- 05 servomotores de 2.5Nm
- 01 interface de IO
- 01 IMU

- 01 GPS
- 01 câmera stéreo
- 01 câmera LWIR
- 05 sensores de proximidade
- 01 sensor ultrassônico
- 01 sensor de temperatura
- 03 sensores de corrente
- 01 computador central para processamento das informações
- 01 placa de gerenciamento de energia
- 01 placa de gerenciamento de baterias
- 02 baterias de 12V

A Figura 2.23 é somente uma representação esquemática para o desenvolvimento da tese, no Apêndice ?? é apresentado os diagramas elétricos e eletrônicos para a compreensão total do sistema eletro-eletrônico considerado para este trabalho.

2.2.1 Especificação técnica

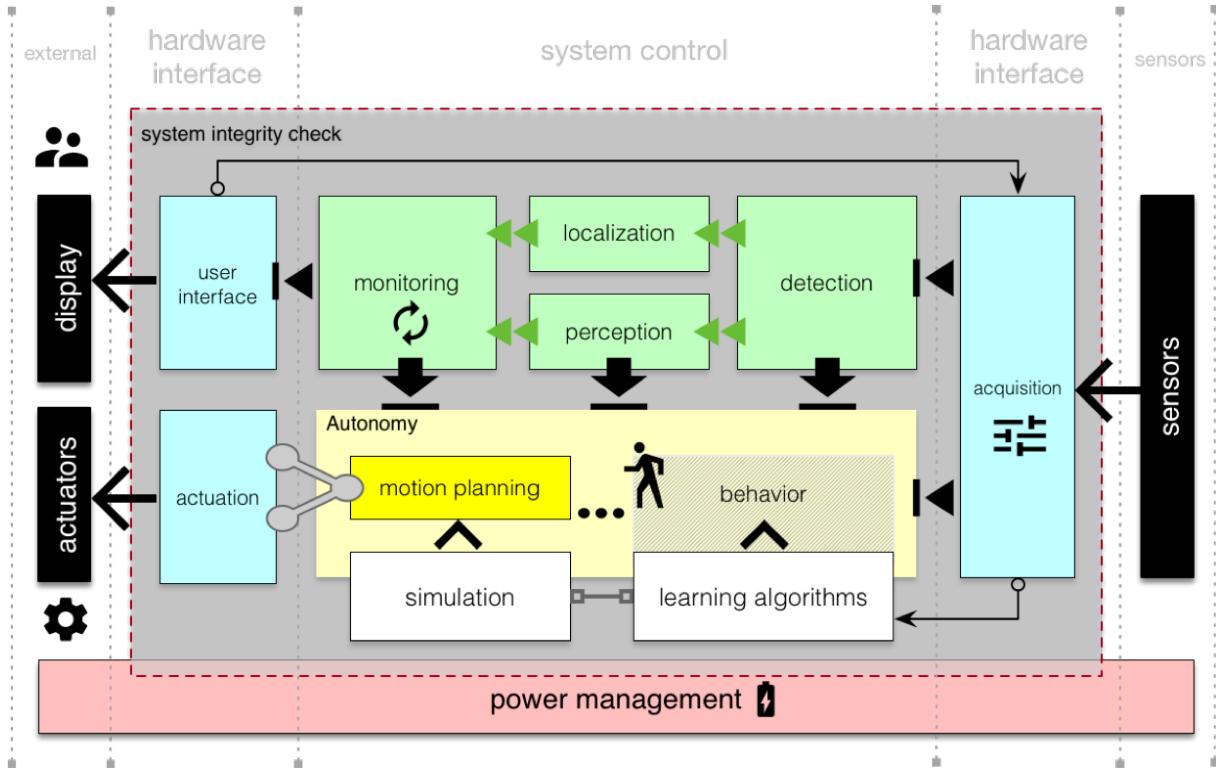
lakjfldksjfdslakjf

2.2.2 Arquitetura geral do sistema

Para que o objetivo principal fosse atendido, a arquitetura do sistema foi elaborado compreendendo como um processo constituído de entradas e saídas, conforme representado pela Figura 2.24. Logo, na arquitetura desenvolvida tem-se uma região sendo considerada como a região onde os sensores são os agentes coletores dos eventos desempenhado pelo robô; concomitantemente as saídas são consideradas como os atuadores que realizam a transposição e a translação do robô, nesta região faz parte também os displays de acesso as informações enviadas pelo robô, assim como a visualização da interface com o robô e o usuário.

A estrutura da arquitetura apresentada baseia-se no *framework* ROS, o qual possibilita a integração de todas as funcionalidades necessárias para o desenvolvimento do sistema

Figura 2.24: Arquitetura do robô ELIR.



robótico, trabalhando no conceito de nós, o *framework* facilita a identificação de problemas durante a fase de desenvolvimento e também a modularização dos códigos.

2.2.3 Arquitetura de software

2.3 Desdobramento da função qualidade

asdfsdfsdf

2.3.1 Requisitos técnicos

asdfsadfsdf

Materiais e Métodos

asdfasdfsdf

3.1 Especificação dos componentes

asjdfklkjdsaf

3.1.1 Estrutura analítica do protótipo

asdkjfsdalkjf

3.1.2 Lista de componentes

asfkjdsahfkjs

3.2 Diagramas mecânicos

asdfsdaf

3.3 Modelo esquemático de alimentação e comunicação

asdfadsfsdfs

3.3.1 Diagramas elétricos

asdfsdaf

3.3.2 Esquemas eletrônicos

asdfsdf

3.4 Especificação das funcionalidades

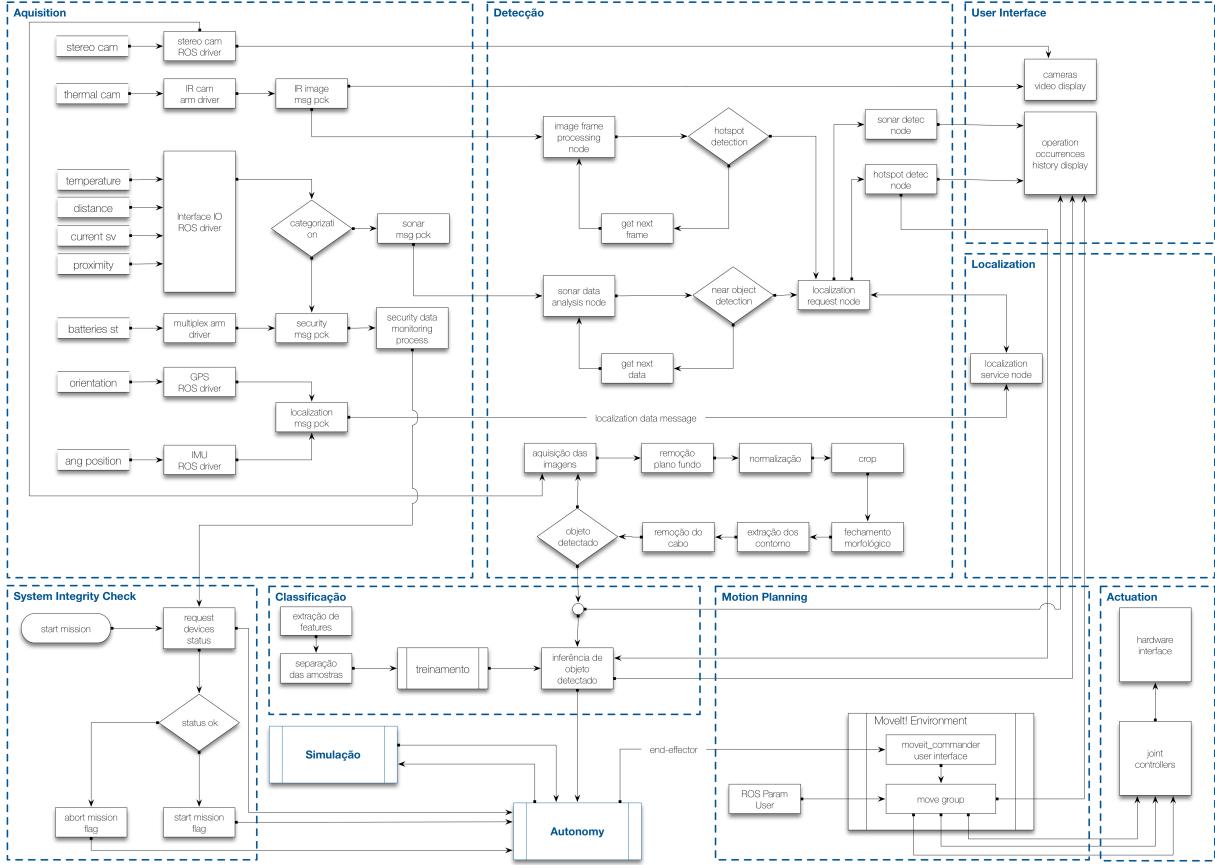
Diante da arquitetura apresentada anteriormente e focando nos objetivos traçados no Capítulo ??, o sistema robótico foi dimensionado para onze funcionalidades distintas:

1. sistema de verificação da integridade
2. gerenciamento de energia
3. aquisição
4. localização
5. planejamento de movimento
6. atuação
7. detecção
8. classificação
9. interface do usuário
10. autonomia
11. simulação

A Figura 3.1 apresenta o fluxo de informações entre as funcionalidades. Este fluxo deve ser compreendido para que seja estabelecida as relações entre as funcionalidades e o entendimento entre elas, essa compreensão impactará na melhor elaboração da árvore de falhas do sistema e proporcionará um sistema mais confiável.

Nas seções seguintes são apresentados em maiores detalhes sobre cada uma das funcionalidades do sistema robótico. Para que fosse melhor compreendido, o desenvolvimento destas funcionalidades foram agrupadas em cinco áreas: movimentação, percepção, interface do usuário, autonomia e simulação. As duas áreas iniciais foram subdivididas em planejamento de movimento, sistema de verificação de integridade, atuação e gerenciamento de energia para a primeira área de nome **movimentação**, que tem como principal objetivo garantir a execução da missão e transposição de obstáculos. Para a segunda área,

Figura 3.1: Fluxo de informações do sistema.



nominada por percepção, a subdivisão ficou da seguinte forma: aquisição, detecção, classificação e localização, que como o significado do próprio nome apresenta como objetivo principal a percepção do robô diante do ambiente inserido.

3.4.1 Fluxo das informações

3.4.2 Motion Planning

3.4.2.1 Definição da funcionalidade

A funcionalidade de *Motion Planning* é responsável por realizar o planejamento da trajetória do Robô, utilizando o software *MoveIt!* que realiza o cálculo da cinemática inversa para encontrar a melhor forma de ultrapassar os obstáculos.

3.4.2.2 Dependências

O software moveit pode utilizar o modelo matemático da cinemática inversa do robô ou um arquivo do tipo URDF. O nome URDF é uma sigla para *Unified Robot Description Format*, esse arquivo é uma especificação em XML utilizada para descrever robôs. Modelos em URDF apresentam uma simplicidade na descrição do robô, e para o caso do Robô *Elir*, utilizar o modelo URDF possibilitará uma aproximação fiel ao modelo real do robô, assim para o cálculo da cinemática inversa será utilizado o seu modelo URDF e não o seu modelo matemático.

3.4.2.3 Premissas Necessárias

Para o correto funcionamento dessa funcionalidade as seguintes premissas são necessárias:

- A configuração dos limites de giro das juntas do robô estarão compatíveis com os comandos enviados
- O modelo URDF do robô estará adequado com o modelo físico
- O pacote gerado pelo *MoveIt! Setup Assistant* estará configurado adequadamente

3.4.2.4 Descrição da Funcionalidade

A movimentação do robô na linha acontecerá por movimentos de translação e transposição de obstáculos. A translação na linha será feita por controladores de torque nas rodas do robô, enquanto a transposição do obstáculos utilizará o moveit. Por meio da ferramenta *MoveIt! Setup Assistant*, se utiliza o modelo do robô para criar um pacote do ROS com os principais arquivos pelo moveit. A configuração correta do moveit possibilita que se utilizem as funções da sua biblioteca para o cálculo da trajetória, levando em consideração também obstáculos no caminho.

O moveit fornece uma *user interface* que recebe o end-effector, a nomenclatura atribuída ao node feito em python que recebe o *end-effector* é `moveit_commander`. O *node* responsável por fazer a integração da user interface com os parâmetros recebidos pelo *ROS Parameter Server* com o *end-effector* para fazer os cálculos é denominado `move_group`. O *node* `move_group` também pode receber parâmetros como leituras dos sensores do robô e nuvens de pontos.

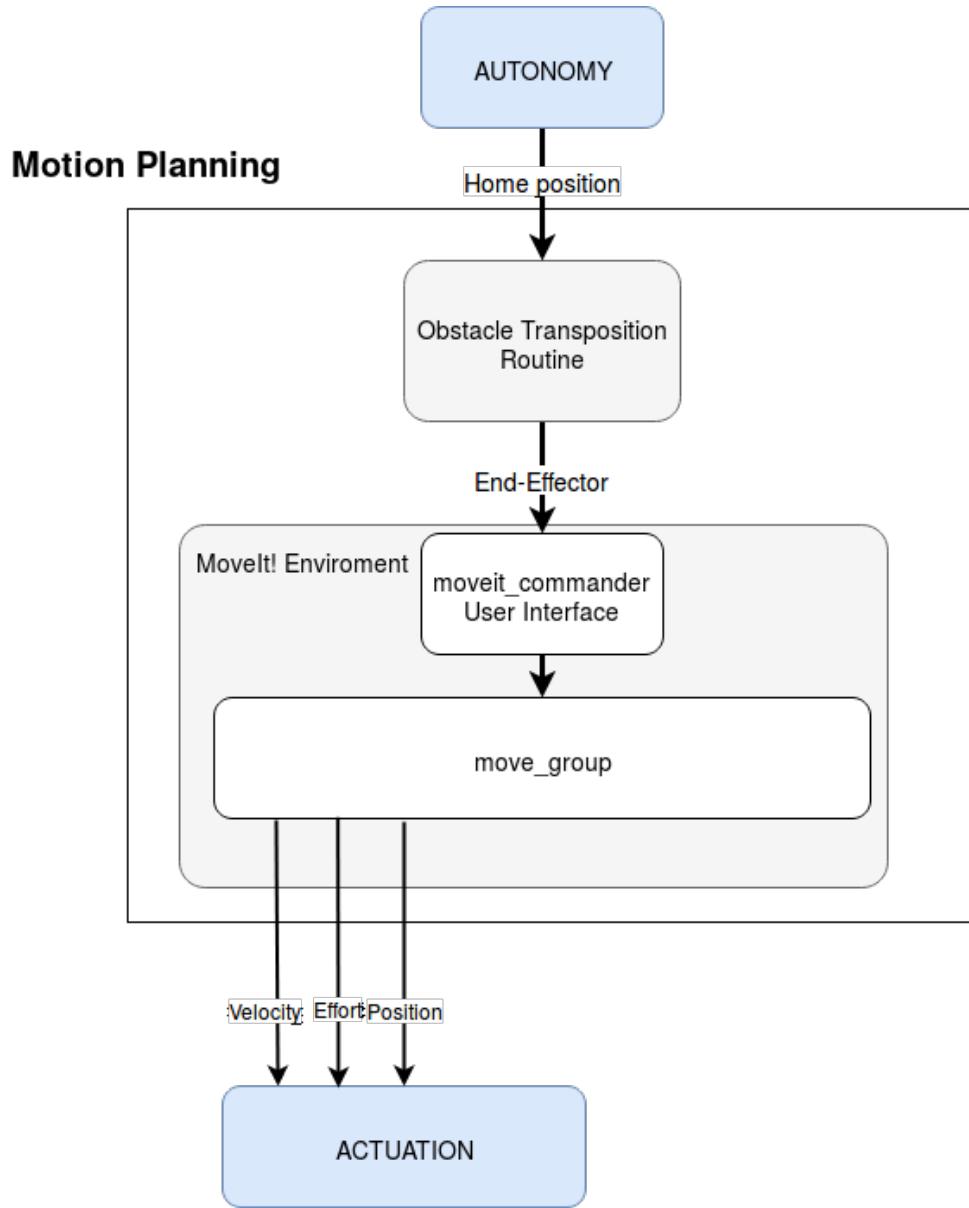


Figura 3.2: Fluxograma de funcionamento da funcionalidade de Motion Planning

Fonte: Própria

3.4.2.5 Saídas

Por meio da compatibilização do *MoveIt!* com o *ROS*, a saída dessa funcionalidade são os comandos de velocidade, esforço e posição para cada junta do robô.

3.4.3 Actuation

3.4.3.1 Definição da funcionalidade

A funcionalidade de Actuation tem como objetivo mover a estrutura física do robô, possibilitando o controle dos movimentos das juntas, garras e unidades de tração.

3.4.3.2 Dependências

Essa funcionalidade depende das funcionalidades de *Power Management* e *Motion Planning*. O *Power Management* será responsável por fazer alimentação dos motores, possibilitando controlar a corrente máxima fornecida para cada grupo. A dependência em relação à funcionalidade de *Motion Planning* está atrelada principalmente com o software *MoveIt!*, que ao receber um *end-effector*, realiza o cálculo de trajetória e envia os comandos de velocidade, esforço e posição para os controladores das juntas, garras e unidades de tração.

3.4.3.3 Premissas Necessárias

Para o correto funcionamento desse módulo, devem ser consideradas as seguintes premissas:

- Os motores devem estar configurados de acordo com o padrão de ID determinado pela equipe, fazendo parte da mesma malha de controle;
- Os controladores das juntas, garras e unidades devem estar configurados de acordo com os comandos que serão recebidos pelo *MoveIt!*;
- Os 3 grupos de motores estarão em malhas de alimentação de 12V individuais.

3.4.3.4 Descrição da Funcionalidade

O ROS disponibiliza uma série de drivers para compatibilização dos motores dynamixel, possibilitando a criação de controladores específicos no seu ambiente. Serão criados os controladores referentes as juntas e unidades de tração do robô. Os controladores receberão comandos de *velocity* e *position* do *MoveIt!* junto com os comandos para movimentar o

robô na linha. Após os comandos serem recebidos pelos controladores, eles serão enviados para o *hardware* do robô, de acordo do padrão de comunicação dos motores, por meio de comunicação serial.

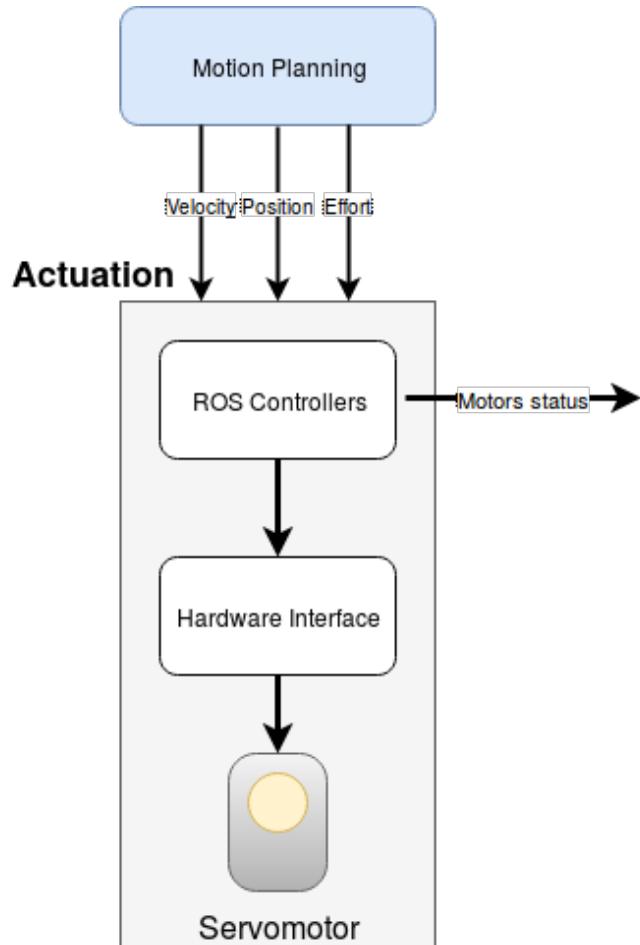


Figura 3.3: Fluxograma da funcionalidade Actuation

Fonte: Própria

3.4.3.5 Saídas

A saída desta funcionalidade é o movimento da estrutura física do robô, que estará de acordo com o planejamento de trajetória do *MoveIt!* e com as instruções para operação na linha

3.4.4 Power Management

3.4.4.1 Definição da funcionalidade

A funcionalidade de *Power Management* é responsável por administrar o fornecimento de energia para os dispositivos eletrônicos do robô, nos níveis adequados de tensão e corrente.

3.4.4.2 Dependências

Essa funcionalidade depende da comunicação serial por meio da biblioteca *rosserial* e da operacionalização do firmware embarcado no hardware (placa) de acordo com as necessidades do projeto.

3.4.4.3 Premissas Necessárias

Para o correto funcionamento desse módulo de *Power Management*, devem ser consideradas as seguintes premissas:

- A placa multiplexadora estará conectada diretamente ao módulo de *Power Management*
- Todos os dispositivos estarão conectados nas suas respectivas entradas
- A placa deverá ser alimentada por 2 baterias
- A placa estará conectada diretamente na NUC, por meio de uma USB

3.4.4.4 Descrição da Funcionalidade

A placa de *Power Management* fornece diversos recursos para integração com o ROS. Seu firmware, além de realizar as medições e controle dos níveis de tensão e corrente para alimentação do robô, estará adaptado com as seguintes funcionalidades para que haja integração do hardware com o ROS:

- *Publishers* que contém os status das portas em níveis de tensão e corrente; avisos de surtos de corrente ou sobre-corrente; disponibilidade do hardware de *Power Management*

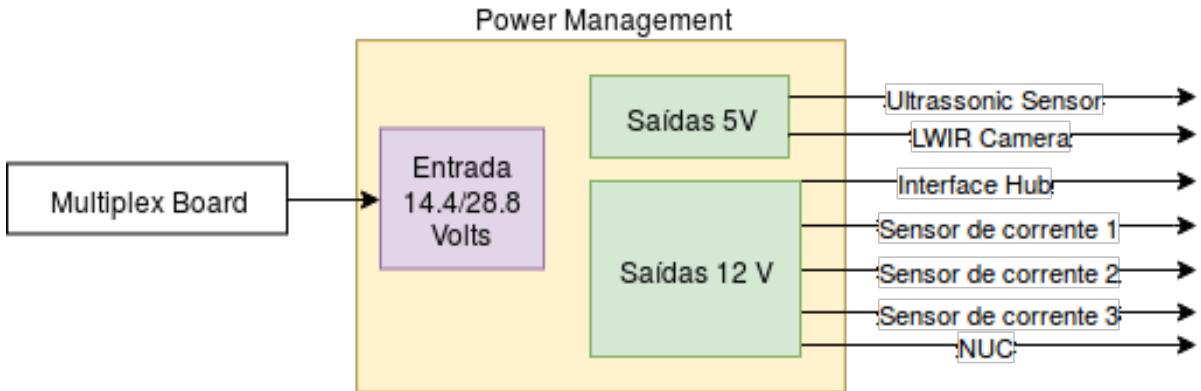


Figura 3.4: Fluxograma de funcionamento da funcionalidade de Power Management

Fonte: Própria

- *Serviços* para realizar a verificação dos níveis de corrente; definição dos limites de corrente nas portas; realização de comandos on-off

O conjunto de baterias fornecerá a energia para o sistema, a placa de *Power Management* irá administrar a distribuição da energia para os seguintes componentes:

- Grupos de servo motores
- Grupo de sensores de corrente
- NUC
- Interface HUB
- Câmera LWIR
- Sensor ultrassônico

3.4.4.5 Saídas

A funcionalidade irá disponibilizar a energia para o robô e as seguintes estruturas no ambiente ROS:

- Tópicos com informações de tensão e corrente nas portas
- Tópico para aviso de sobre-corrente
- Tópico para informar disponibilidade da placa
- Serviços para ler e configurar limite de corrente das portas
- Serviço para ligar ou desligar energia em uma porta

3.4.5 System Integrity Check

3.4.5.1 Definição da funcionalidade

É a funcionalidade responsável por checar a integridade do sistema antes do início da missão, verificando os subsistemas e suas variáveis.

3.4.5.2 Dependências

A funcionalidade receberá informações dos seguintes componentes

- Sensor de Temperatura
- Servomotores
- Câmera IR
- Câmera Stéreo
- IMU
- Sensor de Proximidade
- Placa de Power Management
- Sonar
- Baterias

Todas as informações serão enviadas por meio do ambiente ROS, na forma de *Services* ou *Publishers*.

3.4.5.3 Premissas Necessárias

As premissas necessárias para o funcionamento dessa funcionalidade são:

- Os subsistemas do robô irão disponibilizar o seu status no ambiente ROS por meio de tópicos ou serviços
- A checagem fará parte do planejamento de missão

3.4.5.4 Descrição da Funcionalidade

A checagem da integridade do sistema é uma funcionalidade essencial para garantir o sucesso da missão e preservar a integridade do robô. O ROS facilita essa comunicação entre os subsistemas, possibilitando que seja criada uma rotina de checagem antes de cada missão.

Será disponibilizado no sistema uma rotina para iniciar a missão. Ao receber o comando para início de missão, os sistemas serão checados sequencialmente, utilizando estrutura de *Services* e *Publishers* do ROS. Caso algum sistema apresente falha, a missão não se iniciará e o erro será mostrado no *terminal* e registrado no arquivo de *log*. Se todos os sistemas estiverem em funcionamento, se iniciará a missão. O fluxograma da funcionalidade está ilustrado na figura 3.5.

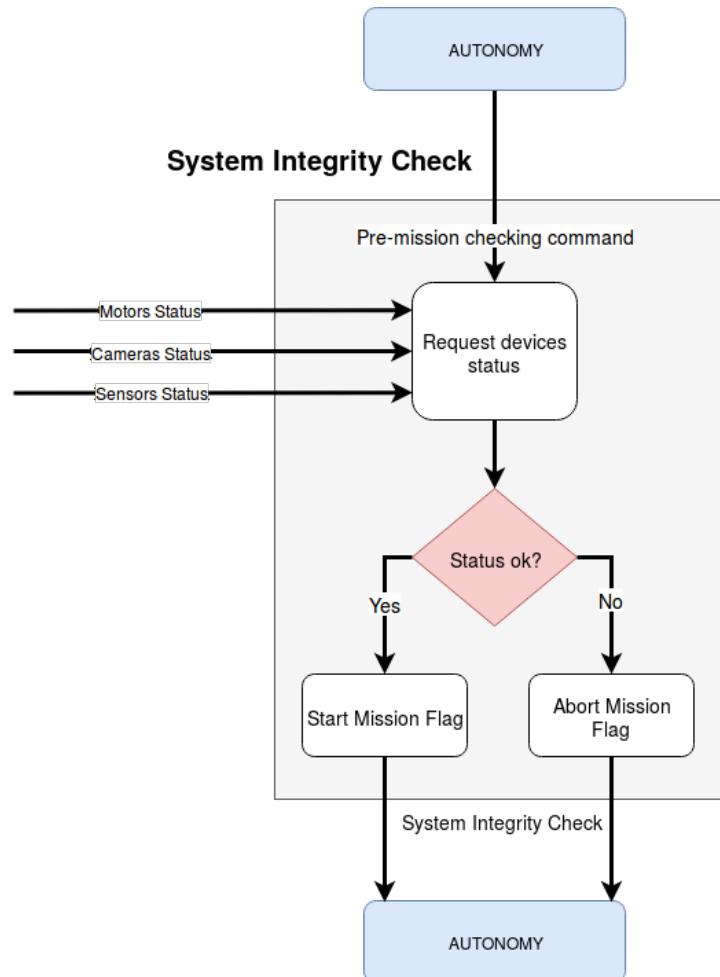


Figura 3.5: Fluxograma da rotina para checagem do sistema

Fonte: Própria

3.4.5.5 Saídas

No início da rotina de inspeção, a funcionalidade será responsável por enviar o sinal inicia a missão. Caso todos os sistemas checados estejam funcionando, a inspeção ocorrerá normalmente, se algum sistema apresentar defeitos, o defeito será mostrado no *terminal*, registrado em log e a missão será abortada.

3.5 Interface do Usuário

asdfadsfsdfs

3.6 Simulação do sistema

asdfadsfsdfs

Resultados

asdfdsfdsf

4.1 Testes unitários

asdfadsfsdfs

4.2 Testes integrados

asdfadsfsdfs

4.3 Avaliação da prontidão tecnológica

asdfadsfsdfs

4.4 Trabalhos futuros

asdfadsfsdfs

Conclusão

Chegou a hora de apresentar o apanhado geral sobre o trabalho de pesquisa feito, no qual são sintetizadas uma série de reflexões sobre a metodologia usada, sobre os achados e resultados obtidos, sobre a confirmação ou rechaço da hipótese estabelecida e sobre outros aspectos da pesquisa que são importantes para validar o trabalho. Recomenda-se não citar outros autores, pois a conclusão é do pesquisador. Porém, caso necessário, convém citá-lo(s) nesta parte e não na seção seguinte chamada **Conclusões**.

5.1 Considerações finais

Brevemente comentada no texto acima, nesta seção o pesquisador (i.e. autor principal do trabalho científico) deve apresentar sua opinião com respeito à pesquisa e suas implicações. Descrever os impactos (i.e. tecnológicos, sociais, econômicos, culturais, ambientais, políticos, etc.) que a pesquisa causa. Não se recomenda citar outros autores.

Apêndice A

QFD

Diagramas mecânicos

Diagramas eletro-eletrônicos

Wireframes

Logbook

Referências Bibliográficas

- BÜHRINGER, M. et al. Cable-crawler–robot for the inspection of high-voltage power lines that can passively roll over mast tops. *Industrial Robot: An International Journal*, Emerald Group Publishing Limited, v. 37, n. 3, p. 256–262, 2010. [2.1](#)
- CAMPOS, M. F. et al. A mobile manipulator for installation and removal of aircraft warning spheres on aerial power transmission lines. In: IEEE. *Robotics and Automation, 2002. Proceedings. ICRA '02. IEEE International Conference on.* [S.l.], 2002. v. 4, p. 3559–3564. [2.1](#)
- DEBENEST, P. et al. Expliner-robot for inspection of transmission lines. In: IEEE. *Robotics and Automation, 2008. ICRA 2008. IEEE International Conference on.* [S.l.], 2008. p. 3978–3984. [2.1](#), [2.1](#)
- GONCALVES, R. S.; CARVALHO, J. C. M. Graphical simulations of a mobile robot suspended on transmission lines using multibody systems software. In: IEEE. *Robotics Symposium and Intelligent Robotic Meeting (LARS), 2010 Latin American.* [S.l.], 2010. p. 1–6. [2.1](#), [2.1](#)
- GONÇALVES, R. S.; CARVALHO, J. C. M. Review and latest trends in mobile robots used on power transmission lines. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 10, n. 12, p. 408, 2013. [2.1](#), [2.1](#), [2.1](#), [2.1](#), [2.1](#)
- GONÇALVES, R. S.; CARVALHO, J. C. M.; CARVALHO, M. Kinematics analysis of a four legged robot suspended on wire. In: CITESEER. *ABCM Symposium Series in Mechatronics.* [S.l.], 2006. v. 2, p. 273–280. [2.1](#), [2.1](#)
- II, E. J. L. et al. Robô autônomo para inspeção de linhas de alta tensão. [2.1](#), [2.1](#), [2.1](#)
- KATRASNIK, J.; PERNUS, F.; LIKAR, B. A climbing-flying robot for power line inspection. In: *Climbing and Walking Robots.* [S.l.]: InTech, 2010. [2.1](#), [2.1](#)
- LEE, J.-K.; JUNG, N.-J.; CHO, B.-H. Development of transmission line sleeve inspection robot. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, v. 58, n. 58, p. 157–161, 2011. [2.1](#)
- LI, Z.; RUAN, Y. Autonomous inspection robot for power transmission lines maintenance while operating on the overhead ground wires. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 7, n. 4, p. 25, 2010. [2.1](#)
- MONTAMBAULT, S.; POULIOT, N. Design and validation of a mobile robot for power line inspection and maintenance. In: SPRINGER. *6th International Conference on Field and Service Robotics-FSR 2007.* [S.l.], 2007. v. 42. [2.1](#), [2.1](#)
- MOURÃO MIGUEL A. M., L. I. E. J. B. A. Q. G. R. A. B. M. H. S. R. M. A. N. S. M. A. C. V. R. A. P. X. L. H. A. Robô de inspeção de linhas - d311. In: ANEEL. *VII Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica, August 17 - 19, 2015.* [S.l.], 2015. [2.1](#), [2.1](#), [2.1](#), [2.2](#)

ONS. *Dados relevantes do sistema de transmissão 2010 - 2013*. 2018. Disponível em: http://www.ons.org.br/sites/multimidia/Documentos%20Compartilhados/dados/dados_relevantes_2010/0206_sistema_transmissao.html. Acesso em: 24/06/2018. [1](#)

PAGNANO, A.; HÖPF, M.; TETI, R. A roadmap for automated power line inspection, maintenance and repair. *Procedia CIRP*, Elsevier, v. 12, p. 234–239, 2013. [1.2](#), [2.1](#)

PHILLIPS, A. et al. Autonomous overhead transmission line inspection robot (ti) development and demonstration. In: IEEE. *Applied Robotics for the Power Industry (CARPI), 2012 2nd International Conference on*. [S.l.], 2012. p. 94–95. [2.1](#)

RANGEL, R. K.; KIENITZ, K. H.; BRANDÃO, M. P. Sistema de inspeção de linhas de transmissão de energia elétrica utilizando veículos aéreos não-tripulados. In: *3rd CTA-DLR Workshop on Data Analysis & Flight Control ocorrido entre*. [S.l.: s.n.], 2009. p. 14–16. [1](#), [2.1](#)

SARTORI, J. R. T. D. *Análise cinemática e geométrica de um robô de inspeção de linhas de transmissão de 138kV*. Tese (Doutorado) — Faculdades Senai Cimatec, 2018. [2.2](#), [2.2](#), [2.2](#)

VENTRELLA, A. et al. Robô móvel aplicado à inspeção em linhas de transmissão. In: *Anais do II Congresso de Inovação Tecnológica em Engenharia Elétrica*. [S.l.: s.n.], 2003. v. 1. [2.1](#)

WANG, L. et al. Design, modeling and control of a biped line-walking robot. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 7, n. 4, p. 33, 2010. [2.1](#), [2.1](#)

ZHOU, F. et al. Control of an inspection robot for 110kv power transmission lines based on expert system design methods. In: IEEE. *Control Applications, 2005. CCA 2005. Proceedings of 2005 IEEE Conference on*. [S.l.], 2005. p. 1563–1568. [2.1](#), [2.1](#)

Desenvolvimento do robô de inspeção.

Michael Faraday

John Nash

James Clerk Maxwell

Nikola Tesla

Salvador, Setembro de 2018.